

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

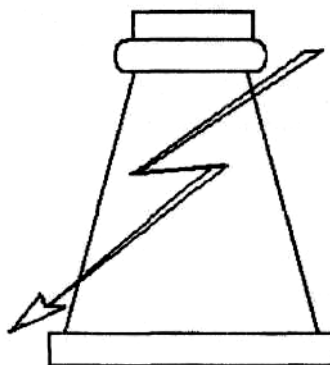
до самостійного вивчення курсу

**«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ»**

(для слухачів другої вищої освіти)

**«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ»**

(для студентів 4-5 курсів денної та заочної форм  
навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та  
електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності  
«Електротехнічні системи електроспоживання»)



Методичні вказівки до самостійного вивчення курсу «Техніка та електрофізика високих напруг» (для слухачів другої вищої освіти) «Електротехнічні системи електроспоживання» (для студентів 4-5 курсів денної та заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. Ф. Рой. – Х.: ХНАМГ, 2007. – 52 с.

Рецензент: В. М. Ковальов

Рекомендовано кафедрою ЕМ,  
протокол № 8 від 07.05.2007 р.

## ВСТУП

*Предмет, зміст і завдання курсу. Основні терміни і визначення: номінальні і припустимі робочі напруги, перенапруги, типи ізоляції, координація ізоляції, зв'язок ізоляції з режимом нейтралі електричних систем. Переваги і недоліки різних режимів нейтралей. Основні відомості про зовнішню і внутрішню ізоляцію. Поняття про техніко-економічний вибір рівня ізоляції.*

Техніка та електрофізика високих напруг - наука про явища, що відбуваються в електротехнічних матеріалах, які використовують в електроенергетиці при екстремальних електромагнітних впливах - високих напругах і сильних струмах, а також технічних можливостях використання цих процесів. Розглядаються властивості і характеристики ізоляційних конструкцій електроустаткування високої напруги й умови їхньої надійної експлуатації при впливі робочої напруги, грозових і внутрішніх перенапругах.

Ізоляція електричних установок підрозділяється на зовнішню і внутрішню: зовнішня - це зовнішні поверхні ізоляторів, повітряні проміжки; внутрішня - це ізоляція обмоток трансформаторів, електричних машин, кабелів, контактів викивачів та ін. Середня межфазна напруга називається номінальною  $U_H$ . Найбільша допустимо напруга для 220 кВ дорівнює  $1,15U_H$ , для 330 кВ -  $1,1U_H$ , для 500 кВ -  $1,05U_H$ . Перевищення напруги понад найбільш припустиму називається **перенапругою**, які підрозділяються на грозові й комутаційні. Грозові це аперіодичні і впливають на ізоляцію короткочасно (мкс); комутаційні - тривалий час (мс) і мають періодичний характер. Захист від перенапруг повинен забезпечувати безперебійну роботу ізоляції і, отже, всього електроустаткування.

**Координація ізоляції** - це узгодження величини електричної міцності ізоляції з напругою пробою захисних апаратів, що обмежують перенапруги в електроустановках. Розробка та створення електроенергетичних систем з оптимальним коефіцієнтом запасу електричної міцності є важливим техніко-економічним завданням розробників цієї техніки.

Література: [1, с. 5-11]; [2, с. 4-11].

## Запитання для самоконтролю

1. Які завдання курсу ТЕФВН?
2. Як класифікується ізоляція електричних установок?
3. Що таке найбільша припустима і номінальна напруга?
4. Поняття про перенапруги, їх види і джерела.
5. Які основні етапи і перспективи розвитку ТВН?

## Тема 1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГАЗАХ

*Рух заряджених часток у газах: концентрація, рухливість, дифузія. Збудження та іонізація часток газу, вторинна іонізація, рекомбінація. Лавина електронів. Умова самостійності розряду. Фізика електропровідності газоподібних, рідких і твердих діелектриків Поляризація діелектриків. Діелектричні втрати.*

Концентрація часток газу дорівнює:  $N = p / k$ , де  $p$  - тиск газу,  $T$  - температура,  $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  еВ/К - постійна Больцмана. Частки газу рухаючись, зіштовхуються на відстані в 1 см  $Z$  раз. Величина  $\lambda = 1/Z$  - середня довжина пробігу частки. В електричному полі на них діє сила  $F = e \cdot E$ , де  $e$  - заряд частки,  $E$  - напруженість електричного поля. Швидкість руху частки в електричному полі пропорційна  $E$ :  $v = \mu / E$ , де  $\mu = v / E$  - рухливість часток, рівна швидкості дрейфу в електричному полі  $E = 1$  В/см. Відношення рухливостей електрона й іона складають:  $\mu_e / \mu_n = 227$ . ( $\mu_e = 400$  см<sup>2</sup>/В с - при  $p = 101,3$  кПа і  $T = 293$  К).

**Дифузія** - це рух заряджених часток під дією градієнта концентрації  $dn/dx$ . Потік дифузії

$$J = -D \cdot dn/dx,$$

де  $J$  - число часток, що проходять за одну секунду через одиницю площі;  
 $D$  - коефіцієнт дифузії.

Спрощена модель атома - це позитивно заряджене ядро, навколо якого по

кругових орбітах обертаються електрони. Поглинання енергії атомом приводить до його **збудження**, що супроводжується переходом електронів на більш віддалені орбіти. Повернення атома в нормальний стан (за час  $10^{-8}$  с) супроводжується випромінюванням фотона з енергією  $\varepsilon = h \cdot \nu$ , де  $h$  – постійна Планка;  $\nu$  - частота.

Якщо енергія, що поглинається часткою, достатньо велика, електрон переборює притягіння ядра і стає вільним, а атом перетворюється в позитивно заряджений іон.

**Ударна іонізація** - процес перетворення нейтрального атома в іон в результаті зіткнення його з електроном, прискореним в електричному полі. Відстань, яку пролітає електрон, щоб придбати енергію,  $E_k = \ell \cdot E \cdot x$  достатню для іонізації:  $x_n = v_n / E$ , де  $v_n$  - потенціал іонізації.

Коефіцієнт ударної іонізації дорівнює числу іонізацій, створених електроном на шляху в **1 см** і визначається добутком середнього числа зіткнень на шляху в **1 см** і імовірності іонізації:

$$\alpha = 1 / \lambda \exp (x_n / \lambda).$$

**Вторинна іонізація** – відбувається за рахунок звільнення електронів унаслідок поглинання фотонів або бомбардування катода позитивними іонами.

**Рекомбінація** - процес взаємної нейтралізації різнополярно заряджених часток різного знаку. Число рекомбінацій у  $1 \text{ см}^3$  газу в одиницю часу пропорційно числу зіткнень протилежно заряджених часток і їхньої концентрації

$$dn / dt = -\rho N^2,$$

де  $\rho$  - коефіцієнт рекомбінації.

Самостійним є розряд, що існує без впливу зовнішнього іонізатора. Необхідно, щоб у результаті вторинної іонізації з'явився принаймні один вторинний електрон, здатний створити нову лавину, тобто

$$\gamma \cdot \exp (\alpha L) \geq 1,$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт вторинної іонізації;

$L$  - відстань між електродами.

**Електропровідність діелектриків** обумовлена процесами іонізації, при-

чиною яких можуть бути сильні електричні поля, висока температура, абсорбована волога, наявність домішок і забруднень.

**Поляризація** - процес наведення в діелектрику електричного моменту в зовнішньому електричному полі. Розрізняють електронну, іонну і іонно-релаксаційну поляризацію. Перші дві є зворотними, друга - необоротна. Вектор зсуву часток **D** пропорційний напруженості електричного поля **E**, електричній постійній  $\epsilon_0$  і відносній діелектричній проникності  $\epsilon_r$  діелектрика:  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ .

Діелектричні втрати обумовлені процесами провідності і поляризації діелектрика. Струми провідності діелектрика приводять до розсіювання енергії  $\mathbf{J}_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$ . Струми зміщення  $\mathbf{J}_{\text{см}} = \omega \epsilon_{\text{про}} \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{j} \omega \epsilon_{\text{про}} \epsilon_r \mathbf{E}$ , обумовлені процесом поляризації діелектрика; і при  $\tau > 0$  ( $\tau$  - час поляризації,  $\gamma$  - питома електропровідність) також містить активну складову струму тому процес поляризації супроводжується розсіюванням енергії електричного поля.

Література: [1, с.12-30]; [2, с.20-26].

### Запитання для самоконтролю

1. Дайте загальну характеристику газової ізоляції.
2. Назвіть основні переваги і недоліки повітря як газової ізоляції.
3. Як визначити відносну щільність повітря, як вона впливає на величину розрядної напруги?
4. Поясніть фізику процесу іонізації, та їх різновиди.
5. Що розуміють під поверхневою й об'ємною іонізацією?
6. Поясніть умови ударної іонізації в об'ємі газу.
7. Які гази називають електропозитивними, а які електронегативними? Приведіть приклади.
8. Механізм виникнення лавини електронів. Від чого залежить число електронів у лавині згідно теорії Таунсенда?
9. Дайте визначення коефіцієнта іонізації. Покажіть залежність коефіцієнта ударної іонізації від напруженості електричного поля?
10. У чому сутність явища і умови вторинної іонізації?

## Тема 2. ЗОВНІШНЯ ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

*Властивості й електричні характеристики зовнішньої ізоляції. Газова, рідка і тверда ізоляція. Види п умов випробувань зовнішньої ізоляції. Розряди в повітряних проміжках при постійній і змінній напрузі в однорідному електричному полі. Розрядна напруга. Закон Пашена. Розряди в повітряних проміжках у неоднорідному електричному полі: початкова і пробивна напруга, коронний та стримерний розряди. Ефект полярності електродів. Бар'єрний ефект. Способи підвищення розрядних напруг проміжків з неоднорідними полями. Коронний розряд на лінії електропередач (ЛЕП). Втрати на корону. Радіоперешкоди й акустичні шуми. Розряди в довгих повітряних проміжках при грозових і комутаційних перенапругах. Час розряду і вольт-секундні характеристики повітряних проміжків. Розряди уздовж: поверхні твердої ізоляції. Розряди в слабонеоднорідному і різконеоднорідному полях. Нормальна і тангенціальна складові електричного поля. Ковзний і частковий розряди. Поверхнева ємність. Іскровий і дуговий розряди. Критична довжина дуги. Умова загасання дуг при постійній і змінній напругах. Величина розрядної напруги ізоляторів різної конструкції. Статистичний розкид розрядних напруг. Вплив зовнішнього середовища на величину розрядних напруг. Розрахунок числа ізоляторів у гірлянді. Регулювання електричних полів зовнішньої ізоляції електроустановок. Застосування екранів, бар'єрів, примусового розподілу напруги в ізоляції конструкції.*

Основним видом зовнішньої ізоляції є повітряний проміжок, що має при нормальних атмосферних умовах електричну міцність порядку 30 кВ/см. Тверда ізоляція - порцеляна і скло - порядку 40 кВ/см. Полімерні ізолятори на основі епоксидних компаундів, армовані склопластиком, також мають високу електричну і механічну міцність.

**Випробування ізоляторів** проводять у сухих умовах (сухорозрядні), під дощем (мокророзрядні) і при зволоженому забрудненні (вологорозрядні). Випробування виконують змінною напругою 50 Гц, комутаційними імпульсами 250/2500 мкс і грозовими імпульсами 1,5/50 мкс. Процес іонізації в повітряному

проміжку призводить до виникнення лавини електронів, появи і розвитку стримерного каналу, що переходить у розряд. Розрядна напруга

$$U_p = B (p \ell) / [\ln A (p H) / K]$$

залежить від тиску газу  $p$ , умови самостійності розряду  $K = \alpha \cdot L$  (закон Пашена).

Ступінь неоднорідності електричного поля характеризується коефіцієнтом  $K = E_m \alpha / E_{cp}$ . При  $K > 4$  поле різко неоднорідне і проміжок називають коронуючим. Початкова напруга відповідає умові розвитку самостійного розряду й в однорідному полі збігається з розрядною напругою. У неоднорідному полі вона трохи більша.

**Коронний розряд** виникає в різко неоднорідних полях, де іонізаційні процеси відбуваються тільки поблизу електродів. При зростанні напруги понад початкову, зона іонізації збільшиться і коронний розряд переходить у стримерний, що складається з окремих імпульсів тривалістю порядку 1 мкс. Критерієм переходу лавини в стример є рівність напруженості поля лавини електронів і зовнішнього електричного поля.

**Ефект полярності** обумовлений різницею рухливості електронів і іонів в полях, що створюються об'ємними зарядами, а також характером взаємодії їх із зовнішнім електричним полем, що приводить до збільшення (або зниження) електричної міцності міжелектродного проміжку (МЕП) залежно від форми електродів.

**Бар'єрний ефект** проявляється у збільшенні електричної міцності МЕП при розміщенні поблизу коронуючого електрода діелектричного екрана. У результаті осадження на його поверхні зарядів того ж знака напруженість поля між електродом і бар'єром знижується, а в МЕП воно стає більш однорідним. За допомогою екранів збільшують ефективний радіус кривизни електродів, що підвищує розрядну напругу МЕП до 50%.

**Початкова напруженість** коронного розряду на проводах ЛЕП дорівнює

$$E_n = 24,5 m \delta \{1 + [(0,65) / (\delta r)^{0,38}]\},$$

де  $r$  - радіус проводу;



**m** - коефіцієнт гладкості проводу;

**δ** - відносна щільність середовища.

Утрати на корону обумовлені процесами іонізації і зростають при перевищенні початкової напруги

$$U_n = E_n r \ln 2H / r,$$

де **H** - висота підвісу одиночного проводу.

Струм корони має активну і ємнісну складові, що приводить до втрати електроенергії, яка досягає 40 % від втрат на нагрівання проводів і збільшення ємності лінії. Діаметр проводів ЛЕП вибирають з умови виключення корони в суху погоду

$$30,3 m \delta \cdot r \cdot \ln S / r \geq U_{ном} \sqrt{2} / \sqrt{3},$$

звідки для ліній 110-220 кВ одержимо: **d ≥ 0,011 U<sub>ном</sub>**.

При номінальному **U<sub>ном</sub> ≥ 300 кВ** застосовують розширені проводи, що мають збільшену зовнішню поверхню і непровідну серцевину, що дозволяє знизити напруженість електричного поля на їх поверхні. Інший варіант - розщеплення проводів фаз, коли замість одного фазного проводу великого діаметра використовують кілька проводів меншого діаметра.

Радіоперешкоди від корони охоплюють діапазон від 10 кГц до 1 ГГц і характеризуються вертикальною складовою напруженості електричного поля поблизу поверхні землі **E<sub>2</sub>**. Рівень радіоперешкод визначається

$$Y = 10 \lg ( E_2 / E_1 )^2 = 20 \lg E_2 / E_1, \text{ дБ},$$

де **E<sub>1</sub> = 1 мкВ/м** – базова напруженість.

Рівень акустичного шуму визначається ступенем вологості навколишнього середовища. На відстані 300 м від ЛЕП-330 рівень шуму не повинен перевищувати санітарних норм 45 дБ.

**Розряд у довгих повітряних проміжках** характеризується переходом із стримерної у лідерну стадію, що завершується наскрізною фазою і головним розрядом. Інтенсивність розвитку розряду: початок стримерної форми, наскрізної фази, швидкості поширення і струм лідера - залежать від крутості імпульсу перенапруги. Величина 50%-ої розрядної напруги довгих повітряних проміжків

дорівнює (формула Лемка)

$$U_{\min} = E_c a_0 [1 + \ln (L / a_0)] + E_{\text{до}} a_0 \ln [(L/a_0 - \ln (L/a_0)],$$

де  $E_c$  - середня напруженість у стримерній зоні;

$E_{\text{до}} = 1,5$  кВ/см - початкова напруженість у каналі лідера;

$a_0$  - постійна, рівна їм для проміжку стрижень-площина;

$L$  - довжина МЕР.

**Вольт-секундна характеристика** - це залежність максимальної напруги розряду від часу дії імпульсу. Залежно від ступеня неоднорідності електричного поля в МЕР, вольт-секундні характеристики мають більшу або меншу крутість, що характеризується **коефіцієнтом імпульсу**  $K = U_p / U_n$ .

Величина розрядної напруги уздовж поверхні ізоляторів визначається співвідношенням нормальної і тангенціальної складових напруженості електричного поля на границі розділу двох середовищ. Наявність нормальної складової сприяє зближенню каналу стримера, який має високу температуру, з поверхнею діелектрика, що підвищує імовірність його пробоя внаслідок термічної іонізації. Термічно іонізований канал розряду уздовж поверхні діелектрика, коли нормальна складова напруженості поля перевищує тангенціальну складову, називається каналом ковзного розряду. Напруга ковзного розряду (формула Теплера)

$$U_p = \chi L^{0,2} (d / \epsilon \epsilon_0)^{0,4},$$

звідки випливає, що довжина ізолятора  $L$ , на відміну від його діаметра  $d$ , мало впливає на  $U_p$ .

**Часткові розряди** виникають в ослаблених місцях ізоляцій, наприклад, у газових включеннях, або в місцях різкого посилення поля. Інтенсивність часткових розрядів, характеризується середнім струмом  $I_{\text{ур}} = n_i q$ , (де  $n_i$  - число розрядів в одиницю часу,  $q = \Delta U C_x$  - величина заряду), що дозволяє оцінити якість ізоляції.

Ємність одиниці поверхні діелектрика, обумовлена діелектричною постійною  $\epsilon$  і товщиною  $d$ , і названа **поверхневою ємністю**, що характеризує ступінь неоднорідності поля уздовж поверхні ізолятора.

**Іскровий розряд** є завершальною стадією розвитку стримера в МЕП і з'являється у вигляді яскраво світлого каналу високої провідності, що замикає іскровий проміжок за час  $\sim 10^{-8}$  с. Услід за іскровим виникає **дуговий розряд**, що зберігає стійкість при балансі потужностей, яка подається  $P = E_d \ell I$  (де  $\ell$  - довжина, а  $I$  - струм дуги), яка виділяється в навколишнє середовище. При збільшенні довжини дуги  $\ell$  напруга на ній  $U_d = E_d \cdot \ell$  стане вище прикладеної до електродів, баланс потужності порушиться і розряд згасне.

Ізолятори внутрішньої установки виготовляють на напругу до 35 кВ. Опорно-стрижневі ізолятори зовнішньої установки мають більш розвинуту ребристу поверхню, що збільшує довжину шляху струму витоку і примушує розряд розвиватися під кутом до силових ліній - по шляху з меншою напруженістю електричного поля. Вони виробляються на напругу (35 - 110) кВ. Число ізоляторів у гірлянді

$$n \geq K \lambda_{\text{еф.}} U_{\text{найб.роб.}} / L_y,$$

де  $K = \ell + 0,5 (L_y / D - 1)$  - коефіцієнт ефективності ізолятора;

$D$  - його діаметр;

$L_y$  - довжина шляху витоку струму;

$\lambda_{\text{еф.}} = I_{\text{еф.}} / U_{\text{найб.роб.}}$  - питома ефективна довжина шляху витоку струму одного ізолятора.

Для підвісних тарілчастих ізоляторів величина коефіцієнта  $K$  знаходиться у межах 1÷13. Питома ефективна довжина шляху витоку  $\lambda_{\text{еф.}}$ , нормується залежно від ступеня забруднення атмосфери і номінальної робочої напруги. Ступінь забруднення визначається типом виробництва і розмірами зони довкола нього, що складає від 300 до 9000 м і називається мінімальним захисним інтервалом. За його межами забруднення відноситься до I чи II ступеня. У середині інтервалу встановлюють III - VI ступінь забруднення. У районі засолених ґрунтів враховують солевміст, ступінь вітрової ерозії і відстань до джерела забруднення.

**Регулювання електричного поля** зовнішньої ізоляції полягає у створенні більш однорідного поля за допомогою екранів, які збільшують радіус кривизни

електродів, які підвищує електричну міцність МЕП. Застосування діелектричних бар'єрів збільшує електричну міцність ізоляторів у 2-3 рази при позитивній і в 1,2 - 1,3 рази при негативній полярності коронуючого електрода. Примусовий розподіл напруженості за допомогою системи розподілених екранів дозволяє забезпечити генерування комутаційних імпульсів до 3 МВ при висоті опорної ізоляції в 12 м.

Література: [1, с.45-101]; [2, с. 26-64].

### **Запитання для самоконтролю**

1. *Приведіть умову самостійності розряду в газі.*
2. *Як формується стример? Протиставте його лавині.*
3. *Сформулюйте закон Пашена і поясніть залежність розрядної напруги від тиску і відстані між електродами.*
4. *Які умови самостійності розряду в неоднорідних і однорідних полях?*
5. *Які особливості розряду в довгих МЕП?*
6. *Що таке коронний розряд? Відмінність корони на позитивному і негативному стрижневому електродах.*
7. *Поясніть розвиток розряду в МЕП стрижень-площина при позитивній і негативній полярностях.*
8. *Поясніть вплив бар'єрів на величину розрядної напруги в МЕП з різко неоднорідним полем.*
9. *Приведіть приклади практичного використання коронного розряду.*
10. *У чому особливості уніполярної і біполярної корони?*
11. *Від чого залежать початкова і критична напруженості електричного поля в повітрі, на поверхні проводів?*
12. *У чому причина радіоперешкод, створюваних у коронуючій ЛЕП?*
13. *Оцінка втрат на корону в проводах ЛЕП і способи їхнього обмеження.*
14. *Що таке час розряду, які його складові?*
15. *Дайте визначення вольт-секундної характеристики розряду.*
16. *Яка методика побудови вольт-секундної характеристики?*

17. Які параметри стандартного випробувального імпульсу?
18. Координація вольт-секундній характеристиці ізоляції і захисних апаратів.
19. Що таке коефіцієнт імпульсу?
20. Як впливає вологість повітря на величину розрядної напруги в МЕР?
21. Чому розряд уздовж поверхні твердого діелектрика відбувається при меншій напрузі, ніж у повітряному проміжку?
22. Дайте визначення нормальній і тангенціальній складових напруженості електричного поля, яка їхня роль у формуванні поверхневого розряду в діелектриках?
23. Що являє собою ковзний розряд?
24. Питома поверхнева ємність і її вплив на формування ковзного розряду?
25. Як відбувається розряд по забрудненій і зволоженій поверхні твердого діелектрика?
26. Методи підвищення надійності роботи ізоляції в умовах зволоженого забруднення?

### **Тема 3. ВНУТРІШНЯ ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК**

*Властивості внутрішньої ізоляції. Основні види внутрішньої ізоляції: газова, вакуумна, рідка, тверда і комбінована. Координація ізоляції за рівнем робочих напруг. Вольт-секундні характеристики. Фізичні процеси, що впливають на стан внутрішньої ізоляції: тривалість впливу напруги, температура навколишнього середовища, механічні впливи. Механізм пробою рідких і твердих діелектриків. Регулювання електричних полів у внутрішній ізоляції: градирування, застосування конденсаторних обкладинок, напівпровідникові покриття.*

**Внутрішня ізоляція** - це ділянки конструкцій, у межах яких ізоляційні проміжки між провідниками заповнені газоподібними, рідкими або твердими матеріалами (але не повітря). Для неї характерна залежність пробивної напруги  $U_{пр}$  від часу  $\tau$  впливу прикладеної напруги. Для внутрішньої ізоляції розрізня-

ють: короточасну електричну міцність при впливі грозового імпульсу й імпульсу внутрішньої перенапруги, а також тривалу міцність, при безупинному впливі  $U_{роб}$  протягом усього терміну експлуатації. **Координація ізоляції** полягає в тому, щоб електрична міцність її протягом усього терміну служби  $x$  була вище за можливих перенапруг.

**Теплові впливи** значно прискорюють старіння ізоляції, ініціюючи хімічні реакції, що розкладають діелектрик. Термін при цьому пропорційний швидкості протікання хімічних реакцій:

$$\tau_1 / \tau_2 = 2^{-(T_1 + T_2) / \Delta T},$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  - терміни служби при температурах  $T_1$  і  $T_2$ ;

$\Delta T$  - підвищення температури, що викликає скорочення терміну служби ізоляції в 2 рази ( складає в середньому  $10^\circ\text{C}$ ).

**Механічні впливи** сприяють появі мікро тріщин, у яких розвиваються часткові розряди, що знижують електричну міцність ізоляції. При цьому термін служби  $x$  визначається формулою

$$\tau = \tau_0 \exp [(W - \gamma\sigma) / k],$$

де  $\tau_0$ ,  $W$ ,  $\gamma$  - параметри, що характеризують міцнісні властивості матеріалу;

$\sigma$  - діючі механічні напруги.

**Зволоження** різко збільшує струм витоку і діелектричні втрати, зменшує короточасну і тривалу електричну міцність.

**Пробій рідких діелектриків** відбувається за рахунок що містяться й утворюються в результаті нагрівання пухирців газу, в яких розвиваються часткові розряди.

**Пробій твердих діелектриків** обумовлений кумулятивним ефектом, що полягає в поступовому нагромадженні і розвитку дефектів при багаторазових впливах імпульсів напруги. Зниження пробивної напруги ізоляції характеризується коефіцієнтом кумулятивності  $K_k = U_{ин1} / U_{ин2}$ , рівним відношенню пробивних напруг при одиничному і багаторазовому впливах.

**Регулюванням електричних полів** досягається надійність роботи ізоляції; необхідно, щоб  $E_{max} < E_{дон}$  припустимого. Завдання регулювання полів -

зниження коефіцієнта неоднорідності за допомогою градирування ізоляції, що здійснюється шляхом комбінації матеріалів з різними діелектричними проникностями. Градирування паперово-масляної ізоляції кабелів виконується різними сортами паперу, відносна діелектрична проникність яких змінюється від  $\epsilon_r = 3,5$  до 4,3.

Регулювання поля можна здійснювати і конденсаторними обкладинками з металеві фольги, які є додатковими електродами, що розміщуються в товщі ізоляції між головними електродами. Зміною розмірів, числа і взаємного розташування обкладинок змінюють ємності послідовно включених конденсаторів і, отже, характер розподілу напруженості поля.

**Напівпровідникові покриття** наносять на електроди, що стикаються з твердим діелектриком, для зменшення складової електричного поля уздовж його поверхні і підвищення тим самим електричної міцності ізолятора.

Література [1, с. 102-144]; [2, с. 26- 64].

### Запитання для самоконтролю

1. Поясніть процес формування і вкажіть характерні ознаки електричного, теплового й іонізаційного пробоя внутрішньої ізоляції?
2. Яку небезпеку становить проникнення вологи в ізоляцію?
3. Як впливає бар'єр на пробивну напругу рідкої ізоляції в рівномірному і нерівномірному полі під дією змінної напруги 50 Гц?
4. Які переваги паперово-масляної ізоляції в порівнянні з іншими її видами?
5. Як відбуваються іонізаційні процеси при змінній і постійній напругах у газових включеннях ізоляції?
6. Які фактори впливають на інтенсивність старіння ізоляції?
7. Якими характеристиками можна оцінити стан ізоляції?
8. Поясніть зміст узагальненої вольт-секундної характеристики внутрішньої ізоляції?
9. Приведіть схему заміщення ізоляції, на основі якої базуються методи контролю за її станом?

10. Поясніть фізику виникнення і розвитку часткових розрядів в ізоляції?

#### Тема 4. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

*Види старіння внутрішньої ізоляції. Закономірності електричного старіння. Часткові розряди. Контроль ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів. Теплове старіння. Вплив механічних навантажень на термін служби ізоляції. Фізичні принципи методів профілактичного контролю внутрішньої ізоляції. Схема заміщення неоднорідної ізоляції. Абсорбційні явища в ізоляції. Контроль ізоляції за коефіцієнтом абсорбції. Вимір опору ізоляції. Схеми включення мегомметрів. Ємнісно-частотні характеристики ізоляції. Вимір ємності і тангенса кута діелектричних втрат Електростатичні кіловольтметри. Кульові вимірники напруг. Дільники напруг. Випробування якості міжвиткової ізоляції. Метод індукованої напруги. Випробування ізоляції імпульсами струму і напруги. Генератори ГІН і ГІС. Каскадні схеми дослідних установок.*

**Старіння ізоляції** - це процес погіршення ізоляційних властивостей діелектриків, що відбувається під дією електричних, теплових, механічних, атмосферних і інших факторів. Залежність терміну служби від величини прикладеної напруги має вигляд

$$\tau = A / U^n ,$$

де  $A$  - постійна ізоляції;

$n$  - показник, що залежить від конструкції ізолятора.

Для великих термінів служби (більше  $10^4$  г) залежність  $\tau = f(U)$  має вигляд

$$\tau = A (U - U_{ч.р})^n ,$$

де  $U_{ч.р}$  - напруга появи часткових розрядів - основного фактора електричного старіння ізоляції.

Термін служби ізоляції є випадковою величиною, оскільки залежить не тільки від напруги, що впливає, але і від ряду факторів, що не піддаються контролю, наприклад, кількості, розмірів і розташування мікронерівностей на поверхні електродів, тому при статистичному аналізі використовують функцію екс-



тремального розподілу Вейбулла:

$$F(\tau) = 1 - \exp[-(\tau U^n / AK_b)^c],$$

де  $K_b$  - коефіцієнт, обумовлений конструкцією ізолятора;

$c$  - параметр форми.

**Неруйнівні методи випробувань** - це вимір опору ізоляції,  $tq\delta$ , підвищеною напругою, інтенсивності часткових **розрядів**, абсорбційних струмів. **Руйнівні методи** - це вимір напруги пробою. Випробування підвищеною напругою виявляє зосереджені й інші види дефектів. Його проводять після контролю методами, що не руйнують. Випробувальна напруга повинна бути на 10-15% нижча за первісну (заводську). Час прикладання напруги частотою 50 Гц -1 хв, а напруги підвищеної частоти  $f$ :  $t = 60 \cdot 100/f$ , с - але не менше 20 с.

**Електричне старіння** і термін служби ізоляції залежать від середньої потужності  $P_{ч.р.}$  і енергії  $W_{ч.р.}$  часткових розрядів і їхній вимір подає інформацію про стан діелектрика

$$W_{ч.р.} = \Delta U_x C_x,$$

де  $\Delta U_x$  - скачок напруги на ізоляції при частковому розряді;

$C_x$  - ємність ізоляції;

$U$  - випробувальна напруга.

**Схема заміщення** неоднорідної ізоляції, в якій  $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$  являє собою з'єднані рівнобіжне опір, ємність і  $r\Delta C$  - ланцюжок, обумовлений нагромадженням на границі шарів заряду абсорбції. Струм, що проходить через неоднорідну ізоляцію, змінюється в часі

$$i = U / R + (U / r) \exp (-t / T),$$

де  $T = r\Delta C$  - постійна часу.

Перший член - це сталий струм витоку, другий - експоненційно змінний струм абсорбції, що характеризується коефіцієнтом  $K_{аб} = R_{60} / R_{15}$ , де  $R_{15}$ ,  $R_{60}$  - опору, обмірювані мегомметром через 15 і 60 с.

Із співвідношення

$$C(\omega) = C_r + \Delta C / (1 + \omega^2 T^2)$$

впливає, що еквівалентна ємність ізоляції залежить від частоти живлячої напруги і постійної часу  $T$  тим більше, чим більше неоднорідність ізоляції. Вимірюючи  $C(\omega)$  при  $\omega = 2\pi f$  ( $f_1 = 2 \text{ Гц}$   $f_2 = 50 \text{ Гц}$ ) і беручи відношення  $C_2/C_{50}$ , встановлюємо якість ізоляції (при  $C_2 / C_{50} > 1,3$  - непридатна).

У змінному електричному полі в діелектрику протікають струми провідності  $I_a$ , що обумовлюють активні втрати і струми зсуву  $I_c$ , зв'язані з поляризацією діелектрика. Оскільки струм зсуву також містить активну складову, то і процес поляризації супроводжується розсіюванням енергії. Таким чином,  $\tan \delta = I_a / I_c$ , містить інформацію про провідність і поляризацію діелектрика, а його вимір дає уявлення про якість ізоляції. Вимір здійснюють за допомогою моста, що підключається по прямій або "переверненій" схемі залежно від того, ізольовані обидва електроди випробуваного об'єкта, чи один з них заземлений.

**Амплітудні кіловольтметри** дозволяють вимірювати максимальні значення амплітуди постійної, змінної, імпульсної (у тому числі грозової) повної і зрізаної напруг. Розрядна напруга  $U_p$  міжелектродного проміжку при відносній щільності повітря  $d$  дорівнює:  $U_p = K(d)U_0$ , де  $K$  - поправочний коефіцієнт, що залежить від  $d$ ,  $U_0$  - табличне значення напруги розрядного проміжку.

**Електростатичні кіловольтметри** засновані на вимірі сили притягання між двома електродами  $F(x)$ , до яких прикладене електричне поле  $E$ . Величина сили пропорційна квадрату напруженості чи напруги поля

$$F(x) = 1/2 \epsilon U^2(x) A,$$

де  $A$  - площа електродів;

$x$  - відстань між ними.

Електростатичними кіловольтметрами вимірюють постійну напругу, або ефективне значення змінної напруги, якщо сила усереднюється в часі.

**Дільник напруги** являє собою пасивний чотирьохполюсник, що дозволяє знизити високу напругу до оптимальної величини, зручної для виміру. Конструктивно він виконується з великого числа  $n$  однотипних послідовно включених елементів (резисторів або конденсаторів), до яких прикладена висока напруга  $U$ . Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  знімається з останнього елемента і дорівнює  $U/n$ .

Омічний дільник дозволяє вимірювати високі постійні напруги до 150 кВ і змінні частотою 50 Гц. Ємнісні дільники дозволяють вимірювати екстремально високі імпульсні напруги.

**Випробування міжвиткової ізоляції** здійснюються осцилографуванням струму в нейтралі трансформатора і порівнянні з типовими осцилограмами. Метод індуктованої напруги полягає в подачі на первинну обмотку трансформатора із заземленої нейтраллю напруги підвищеної частоти (не вище 400 Гц) такої амплітуди, при якій напруга на вторинній обмотці дорівнює випробувальній.

Випробування комутаційними імпульсами застосовують для електроустаткування 330 і 500 кВ імпульсами 250/2500 мкс. Внутрішню ізоляцію силових трансформаторів випробують коливальними імпульсами і 100/1000 мкс.

**Генератори ГН** засновані на заряді від випрямляча паралельно включених конденсаторів і наступним переключенням їх послідовно, у результаті чого напруга на них сумується. Каскадне включення 3-х трансформаторів дозволяє завдяки послідовному включенню обмоток одержати високу випробувальну напругу до 2250 кВ.

**Генератори ГС** засновані на розряді зарядженого конденсатора за допомогою швидкодіючого комутатора на низькоомний елемент (іскровий проміжок, плазму) і дозволяє одержати імпульсні струми до 100 кА і вище.

Література [1, с. 171-178, 394-447].

### **Запитання для самоконтролю**

- 1. Перелічіть основні неруйнівні методи випробувань, ізоляції.*
- 2. Поясніть сутність методу профілактики ємність-частота.*
- 3. Поясніть сутність методу профілактики опір-час.*
- 4. Якими методами можна визначити інтенсивність іонізаційних процесів в ізоляції?*
- 5. У чому переваги та недоліки переверненої схеми для виміру тангенса кута діелектричних утрат ?*

6. Назвіть переваги і недоліки випробувань ізоляції підвищеною змінною і постійною напругою.
7. Як вибрати потужність досліджуваного трансформатора?
8. У чому полягають особливості конструкції і роботи високовольтних досліджуваних трансформаторів?
9. Приведіть принципову схему і поясніть роботу каскаду високовольтних досліджувальних трансформаторів.
10. Приведіть схеми одержання високих постійних напруг і поясніть їхню роботу.
11. Приведіть принципову схему ГІН і поясніть його роботу.
12. Приведіть принципову схему ГІС і поясніть його роботу.
13. Поясніть методику виміру високої напруги за допомогою кульових розрядників.
14. Поясніть роботу схеми електростатичного кіловольтметра.
15. Яким способом можна виміряти амплітуду імпульсної напруги; які вимоги висувають до дільників напруги?
16. Як вимірюють параметри імпульсів струму.
17. Які дільники застосовують при вимірі високих напруг?

## Тема 5. ІЗОЛЯЦІЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО УСТАТКУВАННЯ І ЛЕП

*Робоча напруга електричних мереж. Способи заземлення нейтралі. Класифікація ізоляторів. Робота ізоляторів при впливі зовнішніх факторів. Експлуатаційний контроль ізоляторів. Ізоляція введів високої напруги: види, класифікація, особливості експлуатації й випробувань. Ізоляція електричних машин високої напруги: види, класифікація, особливості експлуатації й випробувань. Ізоляція високовольтних трансформаторів. Конструктивні особливості, класифікація, особливості експлуатації і випробувань. Ізоляція трансформаторів струму. Особливості конструкцій, експлуатації, випробувань. Ізоляція високочастотних конденсаторів зв'язку і силових конденсаторів: особливості конструкції експлуатації, випробувань. Ізоляція повітряних ЛЕП. Лінійні ізолятори. Характеристики гірлянд ізоляторів. Розрядні характеристики лінійної ізоляції. Особливості експлуатації та випробувань. Ізоляція високовольтних кабельних ліній: характеристика, методи випробувань.*

У ТВН використовують системи робочих напруг: (110-220, 500-1150) кВ і (150-330-750) кВ. Робоча напруга в будь-якій точці лінії не повинна перевищувати  $1,15 U_{\text{ном}}$  для (110-220) кВ;  $1,1 U_{\text{ном}}$  для 330 кВ;  $1,05 U_{\text{ном}}$  для (500-1150) кВ. Спосіб заземлення нейтралі обумовлений ефективністю ліквідації однофазних коротких замикань (КЗ) і економічністю ізоляції. При 110 кВ і вище доцільна глухозаземлена нейтраль, де КЗ усувається апаратами повторного включення (АПВ). У мережах 3-35 кВ у нейтраль вмикають реактор, що дозволяє ефективно ліквідувати замикання фаз на землю.

**Ізолятори розділяються на:** опорні, підвісні, прохідні. Опорні поділяються на стрижневі й штирьові, підвісні - на тарілчасті й стрижневі. Опорно-стрижневі використовують у закритих розподільних пристроях (ЗРП). Опорно-штирьові застосовують у зовнішніх установках, підвісні тарілчасті - для ЛЕП. Випробування ізоляторів здійснюють змінною напругою 50 Гц, комутаційними і грозовими імпульсами. Випробування змінною напругою здійснюють у сухих умовах і під дощем, що визначає працездатність ізоляції при номінальній на-

прузі. Випробування комутаційними імпульсами 250/2500 позитивної і негативної полярності також проводять у сухому і мокрому стані. Випробування грозовими імпульсами 1,2/50 мкс позитивної і негативної полярності дозволяють перевірити здатність ізоляції витримувати ірзові перенапруги.

Розрізняють шість ступенів **забруднення атмосфери**, що знижують розрядну напругу ізолятора, яка виявляється пропорційною ефективній довжині шляху витоку  $L_{эф} = L_y / k$ , де  $k \geq 1$  - коефіцієнт ефективності ізоляторів, визначається експериментально. Характеристикою надійності ізолятора є питома ефективна довжина шляху витоку  $\lambda_{эф} = L_{эф} / U_{найб.роб.}$ , що нормується від ступеня забруднення атмосфери. Для надійної експлуатації при робочій напрузі необхідна умова

$$L_y \geq k \lambda_{эф \text{ наиб.роб.}}$$

а число ізоляторів  $n$  у гірлянді:  $n \geq k \lambda_{эф \text{ наиб.роб.}} / L_{y1}$ , де  $L_{y1}$  - шлях витоку одного ізолятора. Підвищення надійності роботи ізоляторів досягається чищенням, обмиванням і нанесенням гідрофобних покриттів.

**Класифікація ізоляторів:** за напругою, родом установки, призначенням, конструкцією. За напругою ізолятори розділяють на високовольтні (більше 1000 В) і низьковольтні, за родом установки на: внутрішні й зовнішні. По призначенню: апаратні і лінійні. По конструкції: апаратні розділяються на опорні, опорно-штирьові, опорно-стрижневі, прохідні; лінійні розділяються на штирьові і підвісні.

**Вводи високовольтні** маслонаповнені на ПО, 150, 220, 330, 500, 750 кВ змінного струму від 200 до 4000 А. Для напруги 35 кВ використовують паперово-бакелітові вводи. Вводи на 110 кВ і вище - тільки маслобар'єрні й паперово-масляні, призначені: для трансформаторів і реакторів позначаються буквою -Т, для масляних вимикачів - В, для виводів струмоведучих частин - Л, для спеціальних реакторів - Р.

За конструктивним виконанням: герметичні - Г, із загальною масляною системою - О, з виводом для контролю параметрів - П. **Експлуатація** вводів полягає в періодичному огляді, перевірці тиску масла, регламентній його заміні,

вимірі  $tq\delta$ .

**Ізоляція електричних машин** працює при підвищених температурах, за термостійкістю відноситься до класів В, F, Н. Конструктивно вона поділяється на **головну** (між провідниками і корпусом) і **поздовжню** (міжвиткову). Поздовжня - це три шари лавсанової плівки і шар бавовняної пряжі (ППЛБО) чи два шари склострічки, просочені термостійким лаком (ПСД), чи азбестова ізоляція (ПДА). На головну ізоляцію діють температурні, механічні й електричні перевантаження, вона виготовляється на основі слюдяних і термореактивних матеріалів. Випробується підвищеною напругою 50 Гц протягом 1 хв. Статорні секції до 10 мВА випробують напругою  $2,75 U_{ном} + 4500$  В; потужністю понад 10 мВА - напругою  $2,75 U_{ном} + 6500$  В, виткову ізоляцію - напругою (1,15- 1,3)  $U_{ном}$ .

**Ізоляція трансформаторів** підрозділяється на головну і поздовжню. Головна - це ізоляція обмоток щодо землі і між обмотками, поздовжня - між витками, шарами, котушками. Конструктивно головна ізоляція - це міаслобар'єрна, поздовжня - паперово-масляна або ізолювання і покриття витків і котушки обмотки лаком. Застосовують комбінацію циліндричних, плоских і кутових бар'єрів, розташованих перпендикулярно до силових ліній електричного поля.

Основні методи контролю ізоляції - осцилографування струму в нейтралі трансформатора і порівняння з типовими осцилограмами, а також випробування підвищеною напругою, вимір  $tq\delta$ , опору ізоляції, інтенсивності часткових розрядів. Основна вимога експлуатації - дотримання теплового режиму (максимальна температура масла + 90° С) і контроль напруги.

**Ізоляція розподільчих пристроїв:** трансформаторів струму 6-10 кВ - лита епоксидна ізоляція, що забезпечує механічну й електричну міцність. Ізоляція трансформаторів 35 кВ - паперово-масляна. 110-220 кВ - ідентично. При напругах понад 220 кВ використовують каскадні схеми з паперово-масляною ізоляцією. Експлуатація ізоляції полягає в нагляді, профілактичних випробуваннях і капітальному ремонті.

**Ізоляція масляних вимикачів** має підвищену міцність, оскільки при га-

сінні дуги масло забруднюється, знижуючи розрядну напругу. Внутрішня ізоляція складається з масляних проміжків, ізоляційних бар'єрів, ізольованої штанги і її напрямлюючих. Періодично контролюють опір штанг і напрямлюючих, а масло випробовують на пробій.

**Ізоляція силових конденсаторів** має високу відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r$  і високу тривалу електричну міцність, малі діелектричні втрати, тобто низькі значення  $tq\delta$ . Ізоляція - паперово-масляна (спеціальні газостійкі мінеральні масла або синтетичні рідини на основі хлордіфеніла). Використовується і комбінована ізоляція: шари паперу чергуються із шарами поліпропіленової плівки. Контроль здійснюється виміром опору з попередньою витримкою під напругою протягом 1 хв.

**Ізоляція повітряних ЛЕП** - це повітряні проміжки провід-провід, провід-земля, провід-трос. На опорах ізоляція ЛЕП складається з ізоляторів і повітряних проміжків. Число ізоляторів у гірлянді і їхній тип повинні забезпечувати працездатність ЛЕП при зволоженому забрудненні поверхні і визначається за формулою

$$n \geq K_p U_{\text{найб.р}} / E_{\text{мр}} H,$$

де  $K_p$  - розрахункова кратність внутрішніх перенапруг;

$E_{\text{мр}}$  - розрахункова мокророзрядна напруженість;

$H$  - висота ізолятора.

Розрахунок мінімальної довжини повітряного проміжку провід-опора\* за рівнем внутрішніх перенапруг проводять, виходячи з розрахункової розрядної напруги

$$U_{\text{розр.}} \geq K_p U_{\text{найб.роб}} / K_t K_\delta,$$

де  $K_\delta$  - коефіцієнт обліку несприятливих атмосферних факторів,  $K_t = 0,85$ ;

$\tau$  - стандарт розподілу розрядних напруг при комутаційних імпульсах.

Повна ізоляційна відстань провід-опора складається з найменшої довжини повітряного проміжку і горизонтального відхилення проводу вітром. Відстань між проводами і тросами в середині прольоту визначається умовами захисту від грозових перенапруг і залежить тільки від довжини прольоту. Проміжок провід-



земля вибирають за рівнем внутрішніх перенапруг, з умови безпечного проїзду транспортних засобів висотою 4 м, а ЛЕП 750 і 1150 кВ - з припустимого значення напруженості електричного поля під лінією на висоті 1,8 м.

Для кабелів напругою до 35 кВ найбільш поширена стрічкова паперова ізоляція, просочена маслоканіфольними чи синтетичними в'язкими сумішами. Недолік в'язкого просочення - утворення газових включень, обумовлених циклічним нагріванням при змінному навантаженні. Ізоляція кабелів складається з фазної і поясної частин. Між жилами кабелю - подвійна фазна ізоляція, розрахована на лінійну напругу, а між жилою й оболонкою - фазна і поясна. Для напруги 110-220 кВ використовують маслонаповнені кабелі, в яких паперова ізоляція просочена малов'язким маслом під надлишковим тиском. Тривала електрична міцність у цьому випадку у 3 рази вища. Маслонаповнені кабелі виготовляють низького (0,2 МПа), середнього (0,5 МПа) і високого (0,8-1,6 МПа) тиску. Зі збільшенням тиску електрична міцність ізоляції зростає. У кабелях 110-220 кВ жила екранується шарами напівпровідного паперу, а ізоляція виконується **градированою**. При напругах 110-150 кВ використовують маслонаповнені кабелі високого тиску в сталевих трубах. Використовують і газонаповнені кабелі під тиском, а також кабелі з пластмасовою (поліетилен чи полівінілхлорид) ізоляцією; їхній недолік - низька термостійкість.

Випробувальні напруги кабелів дорівнюють -  $2,5 U_{\text{ном}}$ . Кабелі ПО кВ і вище випробують повними стандартними імпульсами  $5 U_{\text{ном}}$  протягом 15 хв на фазі і вимірюють струм витоку; для кабельних ліній до 10 кВ він повинен бути менше 300 мкА/км, а для ліній (20-30) кВ - менш 800 мкА/км. У кабелів 6 кВ і вище вимірюють  $tq\delta$  і його збільшення при збільшенні напруги від  $0,5U_{\text{ном}}$  до  $2U_{\text{ном}}$ . До і після включення підвищеної напруги вимірюють опір ізоляції (він має бути не менше 50 МОм/км).

Література [1, с. 393-447].

### **Запитання для самоконтролю**

1. Як експериментально визначити пробивну напругу ізолятора, якщо в звичайних умовах ізолятор перекривається, але не пробивається?
2. Які переваги підвісних ізоляторів із скла в порівнянні з аналогічними з порцеляни?
3. Як впливає захисна арматура на розподіл напруги уздовж гірлянди ізолятора?
4. Які фактори впливають на старіння ізолятора?
5. У чому сутність методу визначення дефектних ізоляторів?
6. Як здійснюється вирівнювання електричного поля в прохідних ізоляторах високої напруги?
7. Що досягається покриттям папером стрижня прохідного ізолятора конденсаторного типу?
8. З якою метою застосовують бар'єри і ізолюючого матеріалу в маслонаповнених прохідних ізоляторах?
9. Перелічіть, які види ізоляції трансформаторів відносяться до головної ізоляції, а які до подовжньої.
10. Що розуміють під гарантованою імпульсною міцністю ізоляції трансформаторів?
11. Чому крім випробування ізоляції трансформаторів повною хвилею її випробовують і зрізаною імпульсною хвилею?
12. Що таке коефіцієнт поширення?
13. Як здійснюється перехід електромагнітних хвиль з однієї обмотки на іншу?
14. Що таке компенсаційні екрани в силових трансформаторах, яке їхнє призначення?
15. Перелічіть конструктивні елементи ізоляції силових трансформаторів.
16. Для чого в трансформаторах застосовують екранні кільця?
17. Які види корпусної ізоляції застосовують у потужних генераторах?

*Укажіть характерні риси цих видів ізоляції.*

*18. Покажіть схематично методи ліквідації коронування в місцях виходу стрижня з паза корпусу електричної машини.*

*19. Чому ізоляція статорної обмотки повинна бути гнучкою, як це забезпечується при застосуванні монолітної ізоляції?*

*20. Який вплив на електричну міцність ізоляції має внутрішнє охолодження стрижнів обмотки?*

*21. Чому при випробуванні виткової ізоляції застосовують імпульсну уніполярну напругу, чи імпульсну загасаючу напругу високої частоти?*

## **Тема 6. ПЕРЕНАПРУГ И І ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ**

*Загальна характеристика і класифікація перенапруг. Хвильові процеси в лініях електропередач. Спотворення, загасання і відбиття хвиль у лініях з втратами. Грозава діяльність, її характеристики. Грозоураженість електроенергетичних об'єктів. Види блискавок і їхні характеристики. Розвиток грозового розряду і його параметри. Еквівалентна схема блискавки. Блискавковідводи і заземлювачі. Захисна дія блискавковідводів. Ефективність захисту стрижневими і тросовими блискавковідводами. Призначення робочого, захисного і грозозахисного заземлення. Опір заземлювачів. Характеристики й електропровідність ґрунтів. Імпульсний коефіцієнт заземлювача. Зосереджені заземлювачі. Коефіцієнт використання заземлювачів. Природні й штучні заземлювачі. Заземлення опор ЛЕП, заземлюючи контури станцій, підстанцій і промпідприємств. Апарати захисту. Захисні іскрові проміжки. Трубочасті розрядники і їхні характеристики. Вентильні розрядники: конструкція і характеристики. Зв'язок захисних властивостей вентильних розрядників з режимом заземлення нейтралі. Обмежники перенапруги, їхні характеристики, галузь застосування. Довго іскрові розрядники. Типи і принцип дії.*

Перенапруги поділяються на грозові й комутаційні. Грозові залежать від інтенсивності струму блискавки і є статистичними величинами. Комутаційні

залежать від характеристик електричних мереж і також є статистичними величинами. Імпульс перенапруги характеризується крутістю фронту і тривалістю: грозовий - 1,2/50 мкс, комутаційний - 250/2500 мкс. Комутаційні перенапруги поділяються на: фазні, міжфазні, міжконтактні. При ударі блискавки в провід хвиля перенапруги розтікається в обидва боки з амплітудою

$$U = I_m Z_{np} / 2 ,$$

де  $Z_{np}$  - хвильовий опір проводу, який дорівнює 300 Ом.  $I_m$  - струм блискавки

Хвиля перенапруги деформується за рахунок імпульсної корони і згасає через активні втрати при поверненні струму хвилі в землю. Зниження амплітуди хвилі дорівнює

$$U = U_{max} I^{-a\sqrt{x}} ,$$

де  $x$  - відстань до точки удару блискавки;

$a$  - коефіцієнт =  $0,07 \text{ км}^{-0.5}$ , для ЛЕП 110 і вище.

Подовження фронту (на 1 км) повного імпульсу

$$\Delta\tau = (0,5 + 0,008 U_{max} / h) 1/k ,$$

де  $h$  - висота підвісу проводів;

$k$  - коефіцієнт, рівний 1; 1.1; 1,45, - залежно від числа проводів у лінії.

**Блискавка** - це електричний розряд між хмарою і землею (у 30-40 % випадків) і між хмарами - (60-70 % випадках). При напруженості 24 кВ/см у бік землі розвивається **лідерний розряд**, індуктуючий на поверхні землі заряд протилежного знака, з якого розвивається зустрічний лідер. На відстані ~100 м між ними при напруженості в 10 кВ/см відбувається пробій і за декілька мкс виділяється енергія ~5 мДж. Струм у каналі розряду досягає десятків кА, а температура - близько 30 тис. градусів, унаслідок чого виникає ударна і звукова хвилі. Еквівалентна схема розвитку блискавки - вертикально заряджений провід із щільністю заряду на одиницю довжини  $a$ , що замикається на землю ключем  $K_d$ . Амплітуда струму

$$I_m = \sigma v Z / (Z + R) ,$$

де  $v$  - швидкість поширення розряду;

**Z** - хвильовий опір каналу блискавки;

**R** - опір проводу.

Основні параметри блискавки - форма і величина струму розряду, що характеризуються тривалістю фронту  $\tau_f$ , тривалістю імпульсу  $\tau_n$  і амплітудою струму **I $\sigma$** . Крутість фронту струму блискавки **a = d I $\sigma$  / dt** визначає індуктивне спадання напруги в провідниках і індуктовані напруги в магнітно-зв'язаних мережах. Число ударів блискавки за 100 грозових годин в об'єкт довжиною A, шириною B і висотою H дорівнює

$$n = 6,7 (A + 7H) (Y + 7H) 10^{-6}$$

Число ударів блискавки в 100 км повітряної лінії електропередачі за 100 грозових годин: **n = 6,7 · 600 h<sub>ср</sub>10<sup>-3</sup> ≈ 4 h<sub>ср</sub>**, де h<sub>ср</sub> - висота підвісу тросу. Річне число ударів блискавки в лінію довжиною  $\ell$ , дорівнює: **n<sub>год</sub> = n  $\ell$  / 100 (D<sub>r</sub>/100)**, де D<sub>r</sub> - число грозових годин на рік. Існують стрижневі й тросові **блискавкові-дводи**. Зона захисту стрижневого блискавковідводу являє собою конус висотою **h<sub>0</sub> = 0,92h**, де h - висота стрижня) і радіусом **r<sub>x</sub> = ( 1,1 - 0,002 h) (h - h<sub>x</sub> / 0,85)**, де h<sub>x</sub> - висота об'єкта. Зона захисту тросового блискавковідводу: **h<sub>0</sub> = 0, 95 h; r<sub>x</sub> = 1,7(h - h/0,92)**.

**Заземлювач підстанції** - система горизонтальних смуг і вертикальних стрижнів, опір яких дорівнює

$$R = \rho \left( \frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{(L + n \cdot \ell)} \right),$$

де **A = (0,44÷0,26)**

**L** - сумарна довжина горизонтальних електродів;

**n i  $\ell$**  - число і довжина вертикальних електродів;

**S** - площа заземлювача;

**$\rho$**  - питомий опір ґрунту.

Відношення імпульсного **R<sub>i</sub>** і стаціонарного **R** опорів заземлення називається **імпульсним коефіцієнтом  $\alpha_i$** . Імпульсний опір

$$R_i = \alpha_i \cdot R / \eta_i \cdot n ,$$

де  **$\eta_i$**  - імпульсний коефіцієнт використання заземлювача, що враховує взає-

мне екранування електродів.

**Апарати захисту** обмежують амплітуду імпульсу перенапруги за рахунок пробою іскрового проміжка або підключення нелінійного резистора. Основна вимога до захисних апаратів - узгодження їхніх вольт-секундних характеристик з вольт-секундними характеристиками ізоляції. Недолік іскрового проміжку - ненадійність гасіння цуги. У трубчастих розрядниках типу РТВ або РТФ це реалізується за рахунок викидів газів, що виділяються зі стінки трубки при горінні дуги. Зона застосування РТ - захист лінійних підходів до підстанцій, електроуstattкування малопотужних підстанцій 3-Ю кВ і ділянок перетину ліній різної напруги.

**Вентильні розрядники (РВ)** і нелінійні обмежувачі перенапруги (ОПН) застосовують для захисту електроуstattкування підстанцій. Основний елемент РЕІ - багаторазовий іскровий проміжок і з'єднаний послідовно нелінійний резистор, призначений для гасіння дуги після обмеження імпульса перенапруги. Дугогасна дія РВ характеризується коефіцієнтом гасіння

$$K_{\text{гас}} = U_{\text{пр}} / U_{\text{гас}} ,$$

де  $U_{\text{пр}}$  - напруга пробою іскрових проміжків;

$U_{\text{гас}}$  - напруга гасіння дуги.

Захисна дія резистора характеризується коефіцієнтом захисту

$$K_{\text{зах}} = U_{\text{ост}} / \sqrt{2} U_{\text{гас}} ,$$

де:  $U_{\text{ост}}$  - падіння напруги на резисторі.

Матеріал резистора - вилит чи тервіт здатний змінювати питомий опір від  $10^{-2}$  до  $10^6$  Ом·м залежно від напруги, забезпечуючи проходження дуже великих струмів при високих напругах і малих струмів при номінальній напрузі. Різновид РВ - вентильний розрядник з магнітним гасінням дуги РВМГ і комбінований РВМК, що використовуються в системах 330-750 кВ для обмеження грозових і комутаційних перенапруг.

ОПН виконані на основі оксиду цинку, який має значну нелінійність і велику пропускну спроможність, що дозволяє глибоко обмежувати перенапруги. Коефіцієнт нелінійності ОПН дорівнює 0,08-0,05, що дозволяє виключити іс-

кровий проміжок і підключати резистор безпосередньо до лінії.

Довго іскрові розрядники (РДІ) обмежують перенапруги на ЛЕП 5-35 кВ за рахунок ініціювання ковзного розряда по поверхні ізолятора з довжиною каналу розряду, що суттєво перевищує геометричний розмір захищеної ізоляції. Дуга гарантовано не виникає внаслідок малого градієнта напруженості електричного поля вздовж каналу розряду.

Література [1, с. 208-392], [6, с. 210-250].

### **Запитання для самоконтролю**

1. *Перелічіть основні види перенапруг.*
2. *Яка швидкість поширення хвиль перенапруг у повітряних і кабельних лініях електропередачі ?*
3. *Приведіть еквівалентну схему заміщення хвильового процесу при набіганні хвилі на вузлову точку.*
4. *Приведіть типові форми хвиль, що застосовують у розрахунках грозозахисту.*
5. *Що таке коефіцієнт зв'язку? Який порядок величини цього коефіцієнта для повітряних ліній?*
6. *Перелічіть фактори, що обумовлюють загасання хвиль при русі їх уздовж лінії і деформацію їхнього фронту. Які з цих факторів найбільш ефективні?*
7. *Поясніть процес виникнення індуктованих перенапруг.*

## **Тема 7. ПРИНЦИПИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ ВІД ПЕРЕНАПРУГ**

*Основні принципи захисту підстанцій від ударів блискавки. Показник грозозахисту підстанцій. Захист ізоляції підстанцій від набігаючих з НЕП хвиль. Захисний підхід до підстанцій і його роль в обмеженні амплітуди і крутості імпульсів, що набігають. Захист автотрансформаторів і розземленої нейтралі*

трансформаторів. Захист електричних машин від грозових перенапруг. Основні види і характеристики внутрішніх перенапруг. Схеми заміщення для розрахунку перенапруг. Розрахункові кратності. Вплив режиму заземлення нейтралі на величину перенапруг. Ємнісний ефект підвищення напруги. Перенапруга на кінці ненавантаженої довгої лінії. Вплив пристроїв, що компенсують, і корони на проводах на величину перенапруг. Загальна характеристика і види резонансних перенапруг. Феррорезонансні явища в електричних установках. Комутаційні перенапруги в електричних системах. Перенапруга при включенні лінії. Перенапруга при включенні коливального контуру, вплив загасання і моменту включення. Статистичні характеристики ударних коефіцієнтів. Перенапруга при АПВ. Перенапруга при відключенні ненавантажених ліній. Вплив повторних запалювань дуги. Перенапруга при відключенні ненавантажених трансформаторів і реакторів. Вплив характеристик вимикачів із шунтуючими резисторами. Перенапруга при обриві струму плавкими вставками. Перенапруга при дугових замиканнях на землю в системах з ізольованою нейтраллю. Підвищення напруги на справних і пошкоджених фазах при однофазному дуговому замиканні на землю. Експериментальні дані про величини і тривалість перенапруг. Компенсація струму замикання на землю налаштованими індуктивностями. Призначення й основні характеристики дугогасних апаратів. Зсув нейтралі при використанні дугогасних котушок. Обмеження внутрішніх перенапруг: вимикачі двоступінчастої дії, керування моментом комутації. Вплив реакторів на величини перенапруг, схеми форсування реакторів. Комбіновані вентильні розрядники. Застосування обмежників перенапруг. Комплексний захист ЛЕП надвисокої напруги від внутрішніх перенапруг.

**Блискавкозахист підстанцій** здійснюється за допомогою стрижневих блискавковододів, які встановлюють на порталах, щоглах і дахах будинків. Заземлювачі виконують у вигляді сітки з горизонтальних смуг, з'єднаних з вертикальними електродами, до яких приєднують усі металоконструкції і корпуси електроустаткування. Стаціонарний опір заземлення для підстанцій 110 кВ і вище не повинен перебільшувати 0,5 Ом. Для підстанцій 35 кВ і вище при ве-



ликому питомому опорі  $\rho$  ґрунту необхідні блискавковідводи з індивідуальними заземлювачами. Підстанційні будинки захищають заземленням металеві покрівлі або сітки розміром  $5 \times 5 \text{ м}^2$  зі сталевого дроту діаметром 8 мм. Основний захист підстанцій від імпульсів, що набігають, -вентильні розрядники й обмежувачі перенапруг, а також захищені підходи, що являють собою ділянку лінії довжиною 1 - 3 км, захищену тросовим блискавковідводом. Довжина захищеного підходу визначається ступенем зниження крутості фронту імпульсу до безпечного для устаткування підстанції значення і дорівнює:  $I \geq U_{50\%} / a_{кр} \Delta\tau_{\phi}$ , де  $U_{50\%}$  - 50% імпульсна розрядна напруга лінійної ізоляції,  $\Delta\tau_{\phi}$  - подовження фронту імпульсу на 1 км лінії.

Ефективність захисту електроустаткування підстанції характеризується середнім річним числом перекриттів ізоляції через прорив блискавки  $\beta_1$ , зворотних перекриттів при ударах у блискавковідводи  $\beta_2$ , і перекриттів у результаті перенапруг у лінії  $\beta_3$ ,

$$\text{де } \beta_1 = n_{уд} \cdot P_{пр} \cdot P_{пер} \cdot D_r / 100;$$

$$\beta_2 = n_{уд} \cdot (1 - P_{пр}) \cdot P_{обр} \cdot D_r / 100;$$

$$\beta_3 = 4h_{тр} \{P_a + (1 - P_a)[4h_{оп} P_{оп} / 1 + (1 - 4h_{оп} / l)P_{тр}]\} D_r m \ell_{зн} / 10^4;$$

де  $n_{уд}$  - число ударів блискавки в підстанцію за 100 грозових годин;

$P_{пр}$  - імовірність прориву блискавки в зону захисту підстанції;

$P_{пер}$  - імовірність перекриття ізоляції;

$P_{обр}$  - імовірність зворотного перекриття;

$D_r$  - число грозових годин;

$\ell_{зн}$  - довжина захищеного підходу;

$m$  - число повітряних ліній;

$l$  - висота точки кріплення гірлянди;

$P_a$  - імовірність ураження проводів;

$P_{тр}$  - імовірність пробою троса-проводу. <

Показник грозостійкості підстанції характеризує число років її безаварійної роботи

$$M = 1 / (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3).$$

При грозових перенапругах на вході трансформатора з ізольованою чи розземленою нейтралю в нейтраль вмикають РВ з номінальною напругою на клас нижчою, ніж клас трансформатора. Між РВ і трансформаторами 220 кВ, авто-трансформаторами, трансформаторами із шунтуючими реакторами 330-750 кВ не допускається установка комутаційних апаратів. Устаткування підстанцій 330-500 кВ необхідно захищати не менше, ніж двома комплектами РВ, а 750-1150 кВ - трьома комплектами для зниження струму розрядників і напруги, що залишається.

**Блискавозахист електричних машин** передбачає обмеження напруги на вході і нейтралі, а також обмеження крутості падаючого імпульсу. Це здійснюється розрядниками 1 групи типу РВТ з паралельно включеним для обмеження крутості конденсатором. Застосовують також різні схеми захисту повітряних підходів і способи зв'язку обмотки машини з повітряною лінією (реактор, кабельна вставка). Надійність захисту підвищується установкою на генераторній напрузі ОПН.

Внутрішні перенапруги підрозділяються на: фазні, міжфазні, міжконтактні. У схемі заміщення електроустаткування заміняють зосередженими ємностями й індуктивностями, ошиновка підстанції ланцюговими схемами, захисні апарати - спеціальними схемами. При положистому фронті імпульсу лінія заміщується Т- чи П- подібними схемами. Параметри Т-подібної схеми обчислюють за формулами

$$x = Z \sin \lambda/2; b = (1/z) \operatorname{tg} \lambda;$$

$$x = Z \sin \lambda; b = (1/Z) \operatorname{tg} \lambda/2,$$

де **x, b** - індуктивна і ємнісна складові схеми;

**Z** - хвильовий опір;

**$\lambda$**  - довжина лінії.

Напруга на кінці лінії **E** підвищується через **ємнісний ефект** на ненавантажених лініях. Це підвищення пропорційне **I<sub>c</sub>** і **x** і характеризується відношенням **U/E=K<sub>c</sub>**. У сталому режимі **U<sub>уст</sub> = K<sub>c</sub>·E**. При однофазному КЗ підвищення напруги характеризується коефіцієнтом **K<sub>з</sub>** і кратністю сталої напруги:

$$U_{уст} = K_c \cdot K_3 \cdot E.$$

Сталі перенапруги виникають і при ферорезонансних коливаннях на вищих і нижчих гармоніках, несиметричних комутаціях фаз:

$$U_{уст} = K_{уст} \cdot E,$$

де  $K_{уст}$  - коефіцієнт сталої перенапруги.

При перехідних процесах, зв'язаних із включенням або відключенням, КЗ, обривом фаз та ін., амплітуда перенапруги  $U_{пер}$  перевищує  $U_{уст}$ . Відношення  $K_{уд} = U_{max} / U_{уст}$  називається ударним коефіцієнтом

Тоді

$$U_{пер} = K_{уст} \cdot K_{уд} \cdot E.$$

У розімкнутій лінії великої довжини можливе підвищення напруги завдяки проходженню ємнісного струму лінії через індуктивність джерела й індуктивність лінії. Це - **ємнісний ефект**. Резонанс, що є окремою проявою ємнісного ефекту, настає при рівності вхідного ємнісного опору лінії індуктивному опору джерела, що еквівалентно рівності першої гармоніки власних коливань схеми частоті джерела.

Підвищення напруги приводить до появи корони на лінії і зростання активних втрат, внаслідок чого резонансна крива стає менш гострою з максимумом  $\sim 3,0 \cdot E$ . Обмеження перенапруг компенсують установкою реакторів. Реактор на початку лінії збільшує її вхідний опір, частково компенсуючи ємнісний струм лінії. Для повної компенсації необхідна потужність реактора  $q = tq \beta l$ , де  $\beta = \omega/c = 1,05 \cdot 10^{-3}$  рад/км - коефіцієнт зміни фази,  $l$  - довжина лінії, яка дуже довга і тому на практиці повної компенсації не відбувається. Реактор наприкінці лінії зменшує коефіцієнт передачі:

$$K = 1 / \cos \beta l (1 + q tq \beta l).$$

Вхідний опір лінії тут більший, хоча умова повної компенсації досягається при однаковій потужності реакторів.

Реактор в середині лінії знижує коефіцієнт передачі менше, ніж наприкінці, а, отже, і ступінь компенсації ємнісного струму. При рівномірному розподілі реакторів уздовж лінії знижується потужність, необхідна для повної компенсації.

ції:  $\Sigma q = \beta I$  чи  $\Sigma 1/x_p = \omega \cdot C \cdot I$ , де  $1/x_p$  - повна провідність реактора,  $\omega \cdot C \cdot I$  - ємнісна провідність лінії.

**Ферорезонансні перенапруги** виникають при насиченні магнітопроводів електричних машин і трансформаторів. Якщо опір схеми має ємнісний характер - виникають значні перенапруги, величина і характер яких визначаються режимом заземлення нейтралі.

**Перенапруги при АПВ** виникають при повторному включенні розімкненої лінії внаслідок перехідного процесу, коли сумуються напруги  $U_0$  при включенні незарядженої лінії і напруги при саморозряді лінії через індуктивність джерела, оскільки в інтервалі кутів включення  $180-360^\circ$   $U_0$  і ЕРС мають один знак і сумуються. У результаті максимальний ударний коефіцієнт при АПВ значно збільшується за рахунок напруги заряду, що залишається. Перенапруги при АПВ обумовлені ємнісним ефектом і великими ударними коефіцієнтами.

**Перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених ліній** виникають через перехідний процес при багаторазових включеннях і відключеннях, що супроводжуються підвищенням напруги на ємності до величини  $\sim 5 E_m$ . У лінії при повторному запалюванні дуги через багаторазові відбиття від індуктивності джерела і розімкненому кінці лінії відбувається додаткове збільшення перенапруги. Наявність на лінії реактора приводить до коливального розряду ємності і зниження перенапруги. Необхідні дугогасильні пристрої, що виключають повторне запалювання дуги.

Перенапруги при відключенні **недовантаженого трансформатора** обумовлені повторними запалюваннями дуги у вимикачі й енергією, яка збільшується на індуктивності трансформатора, що відключається. Величина перенапруги досягає  $4 \cdot U_{cp}$ . Ефективний захист - вентильні розрядники між вимикачем і трансформатором. При **однофазних дугових замиканнях** на землю виникає дуга, і струм КЗ при заземленій нейтралі дуже великий. При ізольованій нейтралі чи заземленій через дугогасний реактор струм КЗ не великий. У протяжних лініях ємнісні струми досягають сотень ампер, що сприяє повторним запалюванням дуги під дією напруги, яка відновлюється на дуговому проміжку, і появи

коливань у мережі. Це приводить до виникнення перенапруг при перехідному процесі, що досягають **2,22П<sub>ф</sub>**. Максимум перенапруги виникає, коли повторне запалювання дуги відбувається через півперіоду коливань промислової частоти. Перенапруги небезпечні як амплітудою, так і тривалістю, охоплюють всю мережу, збільшуючи імовірність перекриття ізоляції.

**Вимикачі із шунтуючими опорами** обмежують швидкість і амплітуду напруг, що відновлюються, величину перенапруг. Повітряні вимикачі серії ВВБ із шунтуючими опорами виконують багатохвилинковими. У схемі з електромагнітним трансформатором напруги заряд лінії після обриву струму вимикачем стікає через нелінійну індуктивність трансформатора. Тому електромагнітні трансформатори напруги є ефективним засобом запобігання й обмеження перенапруг.

Основні принципи захисту від комутаційних перенапруг:

- обмеження числа режимів, що сприяють виникненню перенапруги;
- обмеження амплітуд перенапруг вентильними розрядниками або шунтуючими опорами;
- обмеження амплітуд сталих перенапруг;
- попереднє (до комутації) підключення реакторів поперечної компенсації;
- установка при включенні лінії знижених коефіцієнтів трансформації.

Установку вентильних розрядників роблять на кінцях ЛЕП, оскільки найбільші напруги виникають на розімкненому кінці лінії. Реактор встановлюють на початку лінії для компенсації ємнісного струму, що проходить через обмотки генератора.

Література [1, с. 208-292].

### **Запитання для самоконтролю**

1. Поясніть схему розвитку грозового розряду у всіх його стадіях.
2. Чим визначається число ударів блискавки в наземні об'єкти?
3. З яких елементів складається блискавковідвод?

4. Як визначити зону захисту одиночного стрижневого блискавковідводу?
5. Як визначити зони захисту двох, трьох і більше блискавковідводів?
6. Чим визначається надійність блискавкозахисту?
7. У чому полягає захисна дія тросів при прямих ударах блискавки й індуктивних перенапруг?
8. Визначіть імовірність прориву блискавки через тросовий захист ЛЕЙ з висотою опор 45 м і кутом захисту 30°?
9. Перелічіть призначення заземлюючих пристроїв електроустановок.
10. Від чого залежить величина опору заземлення?
11. Які вимоги до робочого і захисного заземлення?
12. Особливості стікання імпульсів струму із зосереджених і розподілених заземлювачів.
13. Вплив величини опору заземлення блискавковідводу на шовірність зворотнього перекриття.
14. Вплив на величину коефіцієнта імпульсу заземлювача амплітуди струму блискавки, питомого опору ґрунту, довжини протяжного заземлювача.
15. Вимоги до імпульсного опору щогли підстанцій.
16. Конструкція і принцип дії трубчастого розрядника.
17. Вольт-секундна і вольт-амперна характеристики вентильного розрядника.
18. Принципи гасіння дуги в іскрових проміжках розрядників серії РВС, РВМГ, РВМК РВТ і РВРД.
19. Який вплив коефіцієнта нелінійності робочого опору і дугогасної здатності іскрового проміжку на захисний коефіцієнт вентильного розрядника?
20. Поясніть фізичну природу ефекту нелінійності робочого опору вентильного розрядника.
21. Поясніть принцип дії обмежувачів перенапруг (ОПН).
22. Вплив на грозостійкість ЛЕП кількості тросів, довжини прольоту, висоти щогли, опору заземлення.

23. Яким чином розземлений трос виконує свої захисні функції? Які фактори впливають на вибір захисного проміжку тросу?
24. Які заходи використовують для зниження крутості хвиль, що набігають?
25. Що таке захисний підхід лінії до підстанції, з яких елементів він складається?
26. Чим визначається ступінь надійності грозозахисту підстанцій?
27. З якою метою захищається ізольована нейтраль трансформаторів?
28. Що таке розземлена нейтраль трансформаторів, чому для її захисту потрібний вентильний розрядник?
29. Як і чому здійснюється захист автотрансформаторів?
30. Приведіть типові схеми грозозахисту підстанцій 6-10 кВ від хвиль перенапруг, що приходять з ЛЕП.
31. Чому для підстанцій 6-35 кВ вимагаються окремо розташовані блискавковідводи, а на підстанціях 110 кВ і вище вони встановлюються на порталних конструкціях?
32. Як впливає кабельна вставка на підході до підстанції на величини перенапруг при захисті електричних машин?
33. Коли і з якою метою на виході генератора встановлюють конденсатори?
34. Приведіть типові схеми грозозахисту електричних машин.
35. Приведіть класифікацію внутрішніх перенапруг.
36. Що розуміють під ударним коефіцієнтом, від чого він залежить?
37. Як впливає режим роботи нейтралі системи на величину граничних кратностей перенапруг?
38. Що таке повторні запалювання дуги у вимикачі?
39. Причини виникнення перенапруг при відключенні ненавантажених ліній, фактори, що впливають на зниження їхньої величини.
40. Поясніть процес виникнення перенапруг при відключенні ненавантажених трансформаторів.

41. Поясніть процес виникнення і розвитку перенапруг у системах з ізольованою нейтраллю при дугових замиканнях однієї фази на землю.
42. Причини, що обмежують величину перенапруг повторного замикання на землю?
43. У яких випадках відбувається зсув нейтралі?

## Тема 8. КООРДИНАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

*Загальні принципи координації ізоляції. Різні види випробувальних напруг. Роль характеристик захисних пристроїв. Координація і рівні ізоляції повітряних ЛЕП. Основи статистичного методу вибору ізоляції ЛЕП. Рівні і координація ізоляції обладнання підстанцій.*

Рівні підстанційної ізоляції координуються з атмосферними і комутаційними перенапругами. Імпульсні випробувальні напруги підстанційного устаткування нормовані за класами робочої напруги. Випробування проводять повним і зрізаним імпульсами. Повний імпульс має параметри: 1,5/40 мкс, зрізаний - 2-3 мкс.

**Внутрішню ізоляцію трансформаторів** випробовують коливальними імпульсами 100/1000 мкс, ізоляція апаратів, ізоляторів і вимірювальних трансформаторів випробовується аперіодичними імпульсами 250/2500 мкс. Величину випробувальної напруги промислової частоти 50 Гц визначають на основі розрахункового значення внутрішніх перенапруг:

$$U_{\text{розр.}} = K_p \cdot U_{\text{нанб.роб.}},$$

де  $K_p$  - розрахункова кратність перенапруги.

Випробувальна напруга внутрішньої ізоляції:

$$U_{\text{випр.}} = U_{\text{розр.вн}} \cdot K_y / K_i,$$

де  $K_i$  - коефіцієнт імпульсу.

На основі експериментальних даних  $K_i = 1,3$ ;  $K_y = 1,15$ . Зовнішню ізоляцію випробують у сухому стані і під дощем:

$$U_{\text{випр.}} = U_{\text{розр.вн}} / K_i \cdot K_y$$



де  $K_d$  - коефіцієнт, що враховує величину атмосферного тиску ( $K_d = 0,94$ ).  
Випробувальну напругу в сухих умовах визначають з формули:

$$U_{\text{вип.с}} = U_{\text{розр.вн}} / 0,84.$$

Для підстанцій, що працюють на кабельну мережу до 15 кВ нормують тільки випробувальну напругу промислової частоти. Для електроустаткування вищих класів напруги  $U_{\text{розр.}} = 3,5 U_{\text{найб.роб.}}$

**Ізоляцію на опорах ЛЕП** вибирають, виходячи з діючих напруг з урахуванням відхилення проводів під дією вітру. Ізоляцією повітряних ЛЕП є повітря, що має малу електричну міцність, тому ізоляційні проміжки великі. Розрядні напруги в ЛЕП підкоряються статистичним функціям розподілу як і амплітуда, швидкість наростання, інтенсивність забруднення, число нульових ізоляторів; у гірлянді. Тому **вибір ізоляції ЛЕП** заснований на сукупній оцінці статистичних функцій розподілу всіх цих величин. Завдання координації ізоляції вирішують для кожного району шляхом використання методу статистичних досліджень (метод Монте-Карло), а також техніко-економічної оцінки розрахункових витрат на спорудження лінії, її ремонт, вартість недовідпущеної енергії. Цьому мінімуму і відповідає оптимальний варіант ізоляції ЛЕП.

Література [1, с. 383-391].

### Запитання для самоконтролю

1. Що розуміють під координацією ізоляції ЛЕП?
2. Як здійснюється координація ізоляції за робочою напругою?
3. Опишіть основні конструктивні особливості тарілчастих ізоляторів.
4. Складіть гірлянди з ізоляторів типу П и ПМ. Яка з гірлянд має більшу сухорозрядну, мокророзрядну й імпульсну розрядну напругу, якщо в гірляндах різне число ізоляторів? Однакові довжини гірлянд?
5. Укажіть призначення і дію захисної арматури на гірляндах. На яких лініях застосовується захисна арматура?
6. Як впливають на розрядні напруги ізоляції на опорах барометричний тиск, температура, дощ, вологість, забруднення, вітер, ожеледь?

7. Розрахуйте, при якому числі ізоляторів типу ПФЕ-4,5 сухорозрядна напруга гірлянди починає перевищувати мокророзрядну.
8. Викладіть порядок розрахунку ізоляції ліній на металевих опорах.
9. Визначіть припустимий ізоляційний проміжок провід-земля на лінії 750 кВ при обмеженні комутаційних перенапруг до  $2,1 U_{\phi}$ .
10. Накресліть схему вимірної штанги для контролю ізоляторів на лінії і опишіть порядок проведення вимірів.
11. Які методи теорії імовірності використовують при виборі ізоляції ЛЕП?

## 9. ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Дайте визначення коефіцієнта ударної іонізації електронами, поясніть характер його залежності від напруженості поля і тиску газу.
2. Як визначаються розрядні напруги в рівномірному полі?
3. Поясніть зміст умови самостійності розряду в газі.
4. Поясніть сутність закону Пашена і залежність розрядних напруг від тиску.
5. Опишіть розвиток розряду між електродами стрижень - площина і поясніть ефект полярності.
6. Поясніть вплив бар'єрів на розрядні напруги проміжку стрижень – площина при різних полярностях стрижня.
7. Поясніть явище запізнювання розряду при імпульсах.
8. Поясніть методику визначення вольт-секундних характеристик ізоляції.
9. Поясніть розвиток коронного розряду на проводах ліній електропередачі постійного струму високої напруги.
10. Поясніть розвиток коронного розряду на проводах ЛЕП змінного струму високої напруги.
11. Поясніть процес розвитку розряду уздовж поверхні твердого діелектрика в рівномірному полі.

12. Поясніть процес розвитку розряду уздовж поверхні твердого діелектрика в нерівномірному полі.
13. Опишіть процес розвитку розряду уздовж забрудненої і зволоженої поверхні твердого діелектрика.
14. Визначіть ємність між проводом і землею, між проводами, а також напруженість на поверхні проводів у трифазній лінії при  $U_n = 110$  кВ. Розташування проводів радіусом 10,3 мм (АС-240) горизонтальне з відстанню між ними 4 м.
15. Визначіть ємності між проводом і землею, між проводами, а також напруженість на поверхні проводів у трифазній лінії при  $U_n = 220$  кВ. Розташування проводів радіусом 11,7 мм (АС-300) - горизонтальне, відстань між проводами 5,5 м, середня висота підвісу 11 м.
16. Поясніть вплив вологості повітря на розрядні напруги повітряних проміжків і уздовж поверхні твердих діелектриків.
17. Назвіть особливості конструкцій високовольтних випробувальних трансформаторів. Приведіть схему каскадного з'єднання випробувальних трансформаторів і поясніть роботу каскаду.
18. Приведіть схему випрямлення високих напруг і каскадного генератора постійного струму. Поясніть їхню роботу.
19. Приведіть схему і поясніть роботу генератора імпульсних напруг.
20. Приведіть схему і поясніть роботу генератора імпульсних струмів.
21. Приведіть схему і поясніть роботу генератора комутаційних перенапруг на основі каскадного з'єднання випробувальних трансформаторів
22. Приведіть схему і поясніть роботу генератора комутаційних перенапруг на основі генератора імпульсних напруг.
23. Поясніть метод виміру амплітудних значень високих напруг за допомогою кульових розрядників.
24. Поясніть методи вимірів імпульсних струмів за допомогою клидонографів і феромагнітних реєстраторів.
25. Опишіть конструкції дільників напруг. У чому причина похибок, внесе-

- них ділянками напруг, як цих похибок можна уникнути?
- 26.Опишіть розрядні характеристики ізоляторів.
  - 27.Поясніть причину нерівномірного розподілу напруги по елементах гірлянд ізоляторів.
  - 28.Прохідний циліндричний ізолятор має переріз струмоведучого стрижня  $4 \text{ см}^2$ . Ізоляція - текстоліт ( $E_{\text{пр}} = 80 \text{ кВ/см}$ ), напруга між стрижнем і фланцем 145 кВ. Коефіцієнт запасу міцності  $K=3$ . Визначите внутрішній радіус фланця, що кріпить,  $R$ .
  - 29.Одножильний кабель напругою 35 кВ має радіус заземленої свинцевої оболонки 3,6 см. Визначіть характер зміни напруженості електричного поля на поверхні струмоведучої жили при поступовому збільшенні її радіуса від 0,6 до 3,0 см.
  - 30.Опишіть конструкцію маслонаповнених кабелів, їхні переваги і недоліки.
  - 31.Викладіть методику профілактичних випробувань ізоляції силових кабелів.
  - 32.Опишіть і поясніть методи оцінки стану ізоляції по зміні опору і визначення коефіцієнта абсорбції.
  - 33.Опишіть і поясніть методи оцінки стану ізоляції по зміні діелектричних втрат.
  - 34.Опишіть і поясніть методи оцінки стану ізоляції по виміру ємності.
  - 35.Опишіть і поясніть методи оцінки стану ізоляції по зміні і виміру інтенсивності часткових розрядів.
  - 36.Опишіть особливості випробувань ізоляції підвищеною змінною і постійною напругою.
  - 37.Приведіть і поясніть схему заміщення ізоляції, на основі якої базуються неруйнівні методи досліджень ізоляції.
  - 38.Приведіть і поясніть основні способи, за допомогою яких можна зменшити втрати на коронний розряд у ЛЕП.
  - 39.Приведіть схему заміщення обмотки трансформатора із заземленою

нейтраллю при впливі на неї хвилі перенапруги і покажіть розподіл напруги уздовж обмотки.

40. Приведіть схему заміщення обмотки трансформатора з ізольованою нейтраллю при впливі на неї хвилі перенапруги і покажіть криві розподілу напруги уздовж обмотки.
41. Опишіть розвиток коливань в обмотках трифазного трансформатора з ізольованою нейтраллю, з'єднаних у зірку, при падінні хвиль на 1, 2 і 3 фази трансформатора.
42. Опишіть розвиток коливань в обмотках трифазного трансформатора, які з'єднані в трикутник, при падінні хвиль на 1, 2 і 3 фази трансформатора.
43. Які випробування проводять для трансформаторів високої напруги і як по їх результатах оцінюють стан ізоляції.
44. Які випробування проводять для ізоляції електричних машин і як по їх результатах оцінюють стан ізоляції.
45. Приведіть схему заміщення обмотки трансформатора при впливі на неї хвилі перенапруги з прямокутним фронтом і постійною амплітудою  $U_0$ , розрахуйте і побудуйте в координатах  $n/N$  узагальнюючи розподіл максимальних потенціалів уздовж обмотки трансформатора, де  $N$  - число елементів обмотки,  $C_0$  - ємність одного елемента (котушки) на землю,  $K_0$  - ємність між елементами (котушками). У розрахунку необхідно врахувати перші три гармоніки.

Вихідні дані до задачі 45.

Номер варіанта	$U_0$ , кВ	$N$	$C_0$ , пф	$K_0$ , пф	Нейтраль
1	2	3	4	5	6
1	100	50	20	1000	Заземлена
2	200	60	30	800	Ізольована
3	200	70	40	900	Заземлена
4	100	55	40	1100	Ізольована
5	100	40	30	900	Заземлена
6	300	60	40	800	Ізольована
7	300	50	45	900	Заземлена
8	200	40	40	1000	Ізольована

Номер варіанта	$U_o$ , кВ	N	$C_o$ , пф	$K_o$ , пф	Нейтраль
9	300	70	35	900	Заземлена
10	100	30	20	1000	Ізольована
11	200	50	30	900	Заземлена
12	100	20	20	800	Ізольована
13	100	35	30	1050	Заземлена
14	200	45	30	950	Ізольована
15	100	40	1 35	900	Заземлена
16	300	50	40	800	Ізольована
17	300	55	40	700	Заземлена
18	200	45	35	850	Ізольована
19	200	55	40	900	Заземлена
20	100	35	30	1050	Ізольована

46. Опишіть процес розвитку грозового розряду, величини струмів блискавки і визначіть імовірність того, що амплітуда струму блискавки дорівнює або більше 50, 70 і 100 кА.
47. Вкажіть основні параметри розряду блискавки. Визначіть імовірність того, що крутість фронту амплітуди струму блискавки дорівнює або більше 10 кА/мкс, 15 кА/мкс і 20 кА/мкс.
48. Покажіть зони захисту стрижневих і тросових блискавковододів і визначіть імовірність прориву блискавки через трос в провід ЛЕП 220 кВ.
49. Приведіть основні характеристики заземлювачів.
50. Як залежить імпульсний коефіцієнт заземлювача від струму блискавки і питомого опору ґрунту.
51. Приведіть припустимі величини опору заземлень опор ЛЕП, що заземлюють контури станції і підстанції.
52. Визначіть імпульсний опір двопроточного заземлювача в ґрунті з питомим опором 500 Ом·м, Довжина променів 15 м. Глибина закладення 0,7 м. Матеріал заземлювача - сталевий смуга 4×40 мм. Розрахункове значення струму блискавки - 70 кА.
53. Горизонтальний чотирипроменний заземлювач виконаний зі сталевий стрижня діаметром 1 см. Довжина кожного променя 10 м, глибина за-

- кладення 0,5. Визначте опір заземлення в імпульсному режимі, якщо питомий опір ґрунту  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , струм блискавки  $50 \text{ кА}$ .
54. Визначіть напругу, що діє на ізоляцію лінії  $110 \text{ кВ}$ , не захищену тросом по всій довжині, якщо удар блискавки відбувається в металеву опору. Струм блискавки  $100 \text{ кА}$ , крутість імпульсу струму  $30 \text{ кА/мкс}$ , висота підвісу проводу  $16 \text{ м}$ , опір заземлення опори в імпульсному режимі  $10 \text{ Ом}$ , індуктивність опори  $10 \text{ мкГн}$ .
55. Розрахуйте хвильовий опір повітряної кабельної лінії  $Z$  і швидкість поширення хвилі  $v$ , якщо параметри повітряної лінії  $L_0 = 1,13 \text{ мГн/км}$  і  $C_0 = 9 \text{ пФ/км}$ , кабельної лінії  $L_0 = 0,32 \text{ мГн/км}$  і  $C_0 = 0,15 \text{ мкФ/км}$ .
56. Швидкість поширення хвилі в кабельній лінії  $150 \text{ м/мкс}$ , хвильовий опір  $35 \text{ Ом}$ . Розрахуйте індуктивність і ємність кабельної лінії.
57. Хвиля з прямокутним фронтом амплітудою  $300 \text{ кВ}$  поширюється по кабелю з хвильовим опором  $40 \text{ Ом}$ , зустрічаючи на своєму шляху реактор з індуктивністю  $4 \text{ мГн}$ , переходить у повітряну лінію з хвильовим опором  $400 \text{ Ом}$ . Визначити величину напруги преломленої хвилі на повітряній лінії через  $5 \text{ мкс}$  після досягнення нею реактора.
58. Стрижневий блискавковідвід висотою  $30 \text{ м}$  захищає від прямого влучення блискавки циліндричний бак з пальним, заритий в землю. Визначити максимально припустимий діаметр бака, розташованого на відстані  $5 \text{ м}$  від блискавковідводу.
59. Викладіть послідовність розрахунку питомого числа відключення лінії з тросами.
60. Опишіть конструкцію трубчастих розрядників і назвіть їхні основні характеристики. Як вибирають трубчастий розрядник по діапазоні струмів відключення.
61. Вкажіть основні елементи і характеристики вентильних розрядників.
62. Опишіть нелінійні обмежувачі перенапруг і приведіть їх основні характеристики.
63. Як виникають атмосферні перенапруги на ЛЕП? Визначіть число розря-

- дів у лінію довжиною в 200 км при середній висоті підвісу троса 15 м, середнім числі грозових годин у році - 45.
- 64.Приведіть рекомендовані засоби грозозахисту ЛЕП напругою 6 - 10, 35-110, 220 кВ і вище.
- 65.Обґрунтуйте основні принципи грозозахисту підстанцій від хвиль перенапруг, що приходять з ЛЕП.
- 66.Який вплив на захист підстанції мають крутість фронту імпульсу перенапруги, відстань від розрядника до найбільш віддаленої ізоляційної конструкції, число підключених ліній, ємність ошиновки й устаткування підстанції?
- 67.Опишіть схему захисту електричних машин, безпосередньо з'єднаних з повітряними лініями; з'єднаних з повітряними лініями через короткі кабельні вставки; з реактором між лінією й електричною машиною. Дайте порівняльну оцінку цим схемам.
- 68.Опишіть процес розвитку перенапруг при дуговому однофазному замиканні на землю в мережі з ізольованої нейтраллю.
- 69.Приведіть призначення, варіанти застосування й основні характеристики дугогасних катушок.
- 70.Опишіть схему компенсації ємнісного струму замикання на землю для трансформатора, в якого відсутня виведена нейтраль.
- 71.Опишіть заходи щодо обмеження внутрішніх перенапруг.

## **10. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ**

При вирішенні задач необхідно використовувати рекомендовану літературу, а також наступні вказівки.

Задачі № 14; 15.

При вирішенні цих задач ємності системи електродів треба розрахувати аналітично через взаємні і власні потенційні коефіцієнти і рівняння Максвелла [3], § 8.7



Задачі № 29; 30.

При рішенні варто використовувати формулу

$$E_x = U_{\phi} / (x \ln R/r), \text{ (кВ/см)},$$

де  $r$  - радіус струмоведучого стрижня ;  $x$  - відстань по горизонталі.

Задача № 46.

При рішенні задачі варто вивчити [3] § 8.8.1. При розрахунку початкового розподілу напруги варто врахувати, що координати  $n/N$  відповідають координатам  $x/l$ , зазначеним у літературі, що рекомендується, амплітуди гармонік  $A_k$  визначають зі формулами:

\* для трансформаторів із заземленої нейтраллю

$$A_k = 2 U_o / 2K\pi[1+(K\pi/\alpha N)^2];$$

\* для трансформаторів з ізолюваної нейтраллю

$$A_k = 4 U_o / (2K-1) \pi \{ 1 + [(2K-1)\pi/2\alpha N]^2 \},$$

де  $K$  - порядковий номер гармоніки.

Задачі №52,53.

Розрахунок опору заземлення в імпульсному режимі рекомендується проводити в такій послідовності:

- \* за заданою величиною питомого опору ґрунту знаходять його розрахункову величину множенням на коефіцієнт сезонності, що коливається в межах від 1,4 до 1,8 для горизонтальних заземлювачів і 1,2 - 1,4 для вертикальних;
- \* використовуючи формули з літератури [3], § 11.2 чи [4], § 20.4, 20.8, визначити опір заземлення для кожного типу електродів у стаціонарному режимі;
- \* за заданою величиною імпульсного струму знаходять струм, що стікає з кожного електрода чи гілки;
- \* за заданою величиною струму в кожному заземлювачі і розрахунковій величині питомого опору ґрунту, використовуючи довідкові дані, знаходять коефіцієнт імпульсу й імпульсну величину опору розтікання  $R$ ;
- \* знаходять імпульсний опір мережі за формулою

$R_{i \text{ сист}} = R/n \cdot \eta$ , де  $\eta$  - коефіцієнт використання (довідкові дані).

№ варіанта	Номер питання				№ варіанта до задачі 45
1	1	17	27	47	1
2	2	18	28	48	2
3	3	19	29	49	3
4	4	20	30	50	4
1	2	3	4	5	6
5	5	21	31	51	5
6	6	22	32	52	6
7	7	23	33	53	7
8	8	24	34	54	8
9	9	25	35	55	9
10	10	26	36	56	10
11	11	17	37	57	11
12	12	18	38	58	12
13	13	19	40	59	13
14	16	20	41	60	14
15	17	21	42	61	15
16	18	22	43	62	16
17	19	23	44	63	17
18	20	24	45	65	18
19	21	25	28	66	19
20	22	26	30	67	20
21	24	17	32	68	1
22	25	18	34	69	2
23	26	19	35	70	3
24	27	20	36	71	4
25	10	21	37	72	5
26	п	22	38	48	6
27	12	23	40	50	7
28	13	24	41	52	8
29	16	25	42	54	9
30	17	26	45	56	10

Вирішення задач і відповіді на запитання повинні пояснюватися схемами й ескізами, виконаними відповідно до ЕСКД; наприкінці роботи слід указати використану літературу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техніка високих напруг. Ізоляція і перенапруги в електричних системах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 404 с.
2. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техніка високих напруг. - Мінськ: Вышэйш.шк., 1982.- 367 с.
3. Долгинов Л.И. Техніка високих напруг в електроенергетиці. - М.: Энергія, 1968. - 464 с.
4. Техніка високих напруг. Переклад з нім. М.: Энергоатомиздат , 1989.-560 с.
5. Довідник по електротехнічних установках високої напруги / Бажанов С.А., Бахтон И.С., Бауштейн И.А. і ін. - М.: Энергоатомиздат, 1981.- 656с.
6. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений / под ред. Халимова Ф.Х. С-П.: Энергоатомиздат, 2002, 272 с.

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	4
Програма курсу.....	4
Питання і задачі до контрольної роботи.....	43
Методичні вказівки до контрольних робіт .....	49
Список літератури .....	53

## Навчальне видання

Методичні вказівки до самостійного вивчення курсу **«Техніка та електрофізика високих напруг»** (для слухачів другої вищої освіти) **«Електротехнічні системи електроспоживання»** (для студентів 4-5 курсів денної та заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»).

Укладач: Рой Віктор Федорович

Відповідальний за випуск *О. Г. Гриб*

Редактор *М. З. Аляб'єв*

План 2007, поз. 161 М

---

Підп. до друку 04.06.2007 р.	Формат 60x84 1/16
Друк на ризографі.	Ум. друк. арк. 2,2
Зам. №	Тираж 100 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 731 від 19.12.2001